

Beste de savoir

Énergie solaire : du panneau
photovoltaïque au réseau électrique

23 novembre 2022

Table des matières

	Introduction	1
1.	Convertir la lumière en électricité avec les panneaux photovoltaïques	2
1.1.	Un peu de physique des semi-conducteurs	2
1.2.	Retour à l'électronique	4
1.3.	Synthèse	5
2.	Augmenter le niveau de tension avec un convertisseur boost	6
2.1.	Principe de fonctionnement	7
2.2.	Régler la sortie par rapport à l'entrée	9
3.	Produire du courant alternatif avec un onduleur	11
3.1.	Principe de fonctionnement	11
3.2.	Modulation de largeur d'impulsion	12
3.3.	Synthèse	14
	Conclusion	15

Introduction

L'énergie solaire a le vent en poupe! Transformer la lumière en électricité grâce aux panneaux photovoltaïques se fait depuis plus de 60ans. La différence aujourd'hui, c'est que la technologie est assez bon marché pour servir à grande échelle, et alimenter ainsi le réseau électrique.

L'énergie solaire a de nombreux avantages: gratuite, inépuisable, non-polluante et disponible sans transport ni extraction. La dépendance aux conditions météorologiques et au cycle jour-nuit, ainsi qu'un prix encore élevé des panneaux solaires, sont un frein et font l'objet de développements actifs. Quoi qu'il en soit, les préoccupations environnementales et le renchérissement des combustibles fossiles sont un formidable moteur pour les énergies renouvelables, et en particulier le solaire.

Entrons sans plus tarder dans le vif du sujet: comment transmettre l'énergie solaire, qui arrive sous forme de rayonnement, au réseau électrique, conçu pour transporter l'électricité? C'est ce que nous allons voir dans ce tutoriel! Au programme: le système de transformation de l'énergie. À la fin de ce tutoriel, vous comprendrez comment la chaîne de conversion—composée des panneaux solaires, d'un convertisseur continu-continu et d'un onduleur—permet de relier les installations solaires au réseau électrique.



Prérequis

Pour une meilleure compréhension, quelques bases en électronique sont conseillées: courant, tension, puissance, composants classiques (résistance, inductance, capacité), assemblage en série et en parallèle.

1. Convertir la lumière en électricité avec les panneaux photovoltaïques

Pour pouvoir transmettre l'énergie solaire au réseau électrique, il faut la transformer en énergie électrique et l'adapter au réseau. C'est le rôle de la *chaîne de conversion d'énergie*. La première étape de la conversion est la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique. À cette fin, on utilise des panneaux photovoltaïques¹.

1.1. Un peu de physique des semi-conducteurs

L'élément de base d'un panneau photovoltaïque est la **cellule photovoltaïque**. Elle est fabriquée à partir de matériaux **semi-conducteurs**.

L'image ci-dessous montre une cellule solaire typique, avec des dimensions d'environ 15cm de côté.



FIGURE 1.1. – Photo d'une cellule solaire en silicium monocristallin ([source ↗](#)).

Les matériaux semi-conducteurs ont des propriétés intermédiaires entre les isolants, comme le plastique, et les conducteurs, comme les métaux. On peut modifier les propriétés d'un matériau semi-conducteur en lui ajoutant des impuretés de manière contrôlée, on appelle cela le **dopage**.

1. Mot formé à partir du préfixe d'origine grecque *photo*, signifiant lumière, et de *voltaïque*, adjectif dérivant de l'unité de tension, le volt, lui-même dérivant du nom du savant italien [Alessandro Volta ↗](#), inventeur de la pile électrique.

1. Convertir la lumière en électricité avec les panneaux photovoltaïques

Vous pouvez voir ça comme le dopage des coureurs cyclistes: les propriétés du matériau sont améliorées! 🍊

Le matériau semi-conducteur le plus courant pour les panneaux solaires est le silicium. Le silicium pur n'est pas adapté à la fabrication des panneaux solaires; on utilise du silicium dopé avec les impuretés adéquates². Pour faire une cellule solaire, on a besoin de créer au sein du silicium deux couches dopées de manières différentes. Une de ces couches à un dopage dit de type P, l'autre dit de type N.

L'accolement de la couche de type P et de la couche de type N forme ce que l'on appelle une **jonction PN**. Cet accolement a des propriétés physiques particulières, qui permettent à la cellule solaire de fonctionner comme une source de tension fournissant un courant électrique lorsqu'elle est éclairée par de la lumière.

L'image ci-dessous montre la structure d'une cellule solaire, vue de côté. On reconnaît en particulier les différentes couches de matériau semi-conducteur.

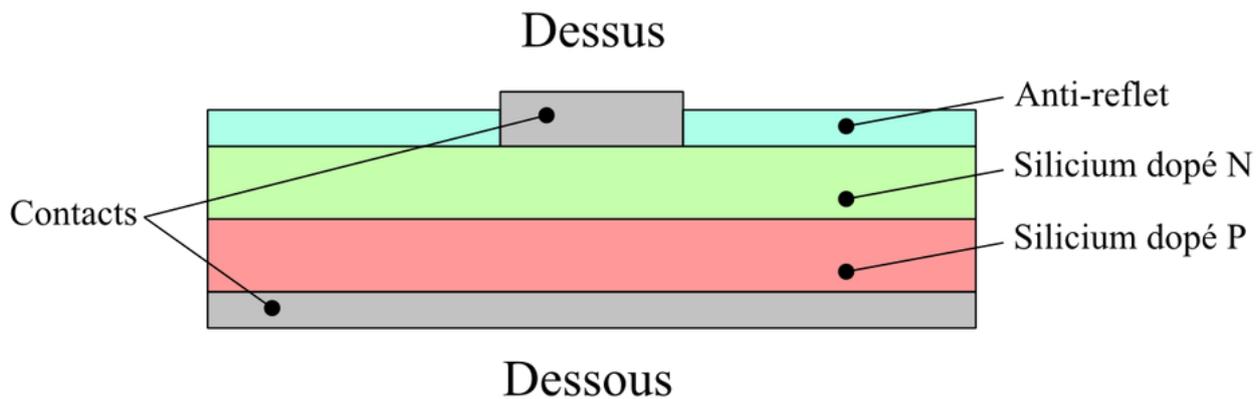


FIGURE 1.2. – Schéma simplifié d'une cellule solaire.

Pour comprendre comment la jonction PN peut transformer la lumière en électricité, il faut d'abord comprendre comment les atomes de silicium récupèrent l'énergie du soleil. Les photons émis par le soleil apportent de l'énergie aux atomes de silicium, qui passent d'un état de basse énergie à un état de plus haute énergie. Cette acquisition d'énergie se fait via les électrons des atomes, qui passent à un niveau d'énergie supérieure, en laissant derrière eux l'équivalent d'une charge positive (un trou d'électron). On parle de création de **paires électron-trou**.

Les électrons et les trous sont des porteurs de charge libres: ils peuvent circuler à l'intérieur du silicium. Au sein de la jonction PN règne un champ électrique, qui va séparer les électrons et les trous, qui seront collectés par les contacts de la cellule. On a donc un courant qui peut circuler!

En quelques mots, une cellule solaire convertit l'énergie des photons en électricité grâce à un assemblage de matériaux semi-conducteurs qui restitue l'énergie lumineuse reçue sous forme de courant électrique.

2. Les impuretés pour le silicium sont en général des atomes de phosphore et des atomes de bore.

1.2. Retour à l'électronique

Maintenant que toute la physique est passée, retour à l'électronique! Du point de vue électrique, les cellules solaires sont caractérisées par l'expression du courant en fonction de la tension, ce qu'on appelle la *caractéristique courant-tension* de la cellule solaire. La caractéristique peut varier d'un modèle de cellule à un autre et surtout en fonction des conditions d'ensoleillement, mais l'allure générale reste la même. En voici une:

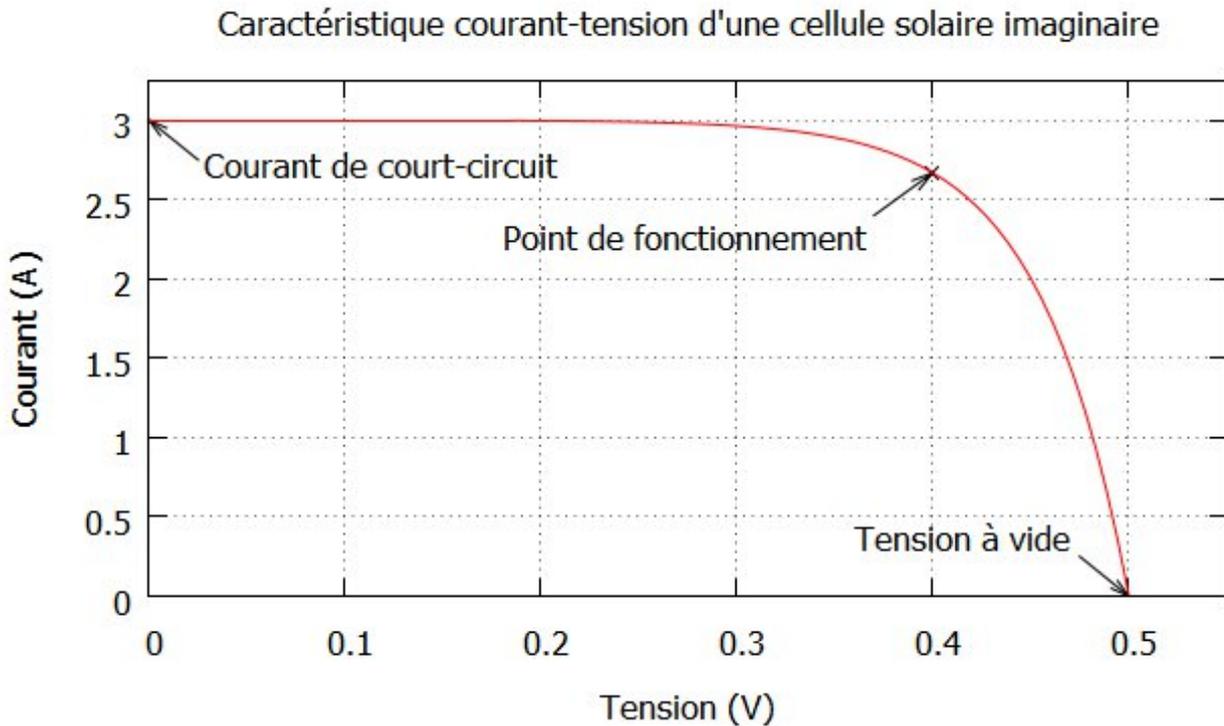


FIGURE 1.3. – Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire imaginaire.

Il y a deux choses importantes à remarquer sur cette caractéristique:

- on a un courant maximal appelé pour une tension nulle, appelé **courant de court-circuit**;
- une tension maximale pour un courant nul qu'on appelle **tension à vide**.

Le courant de court-circuit est de l'ordre de quelques ampères et la tension à vide est toujours d'environ un demi volt. Ces deux valeurs encadrent toujours les valeurs de tension et courant qu'on peut obtenir avec une cellule solaire. Sur la courbe, j'ai indiqué également un **point de fonctionnement**. C'est un point où l'on va se trouver en fonctionnement normal. En général, on choisit le point où la puissance est maximale³.

La courbe précédente montre qu'une cellule solaire seule ne peut fournir qu'une tension et un courant limités. Si l'on veut plus de tension et plus de courant, il faut assembler les cellules

³. On appelle cela le suivi du point de puissance maximale. On rencontre généralement l'abréviation anglaise MPPT pour *maximal power point tracking*.

1. Convertir la lumière en électricité avec les panneaux photovoltaïques

solaires en série et en parallèle pour former des **modules**. Un module solaire est composé de plusieurs dizaines de cellules solaires⁴.

L'assemblage en série permet d'additionner les tensions des cellules solaires. L'assemblage en parallèle quant à lui permet d'additionner les courants. Ce faisant, on peut donc cumuler la puissance fournie par chaque cellule solaire.

On ne peut pas assembler à l'infini les cellules photovoltaïques en série⁵. On se retrouve donc avec une sortie à relativement basse tension avec un courant assez important. Ce n'est pas adapté pour le réseau électrique, qui a un niveau de tension bien plus élevé et qui est en courant alternatif.

Pour fixer les idées, on peut prendre les valeurs d'un module quelconque chez un fabricant lui aussi quelconque, résumées dans le tableau ci-dessous.

Pa-	Va-
ra-	leur
leur	mètre
Ten-	36,7
sion	à V
vide	Cou-
Cou-	rant
de	7,71
court-	A
circuit	Nombre
de	60
cel-	lule

1.3. Synthèse

Dans cette première étape, nous avons donc transformé l'énergie solaire en énergie électrique (courant continu et basse tension). On peut représenter cette conversion par le schéma ci-dessous.

4. Les modules solaires pour les particuliers sont en général des assemblages d'environ 70 cellules solaires en série.

5. L'assemblage en série pose des problèmes de robustesse, si par exemple une cellule tombe en panne ou se retrouve à l'ombre.

2. Augmenter le niveau de tension avec un convertisseur boost

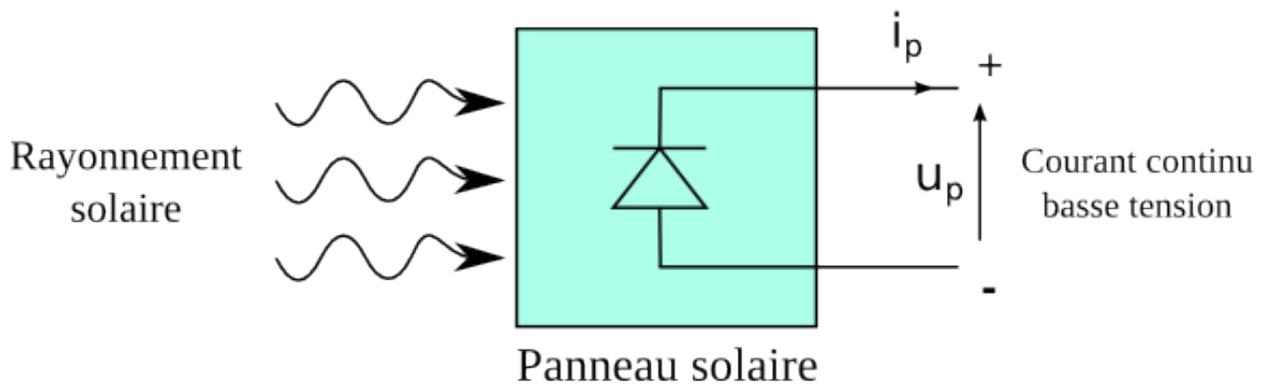


FIGURE 1.4. – La première brique de notre chaîne de conversion.

Le courant et la tension ont alors l'allure suivante, correspondant à un unique panneau solaire imaginaire:

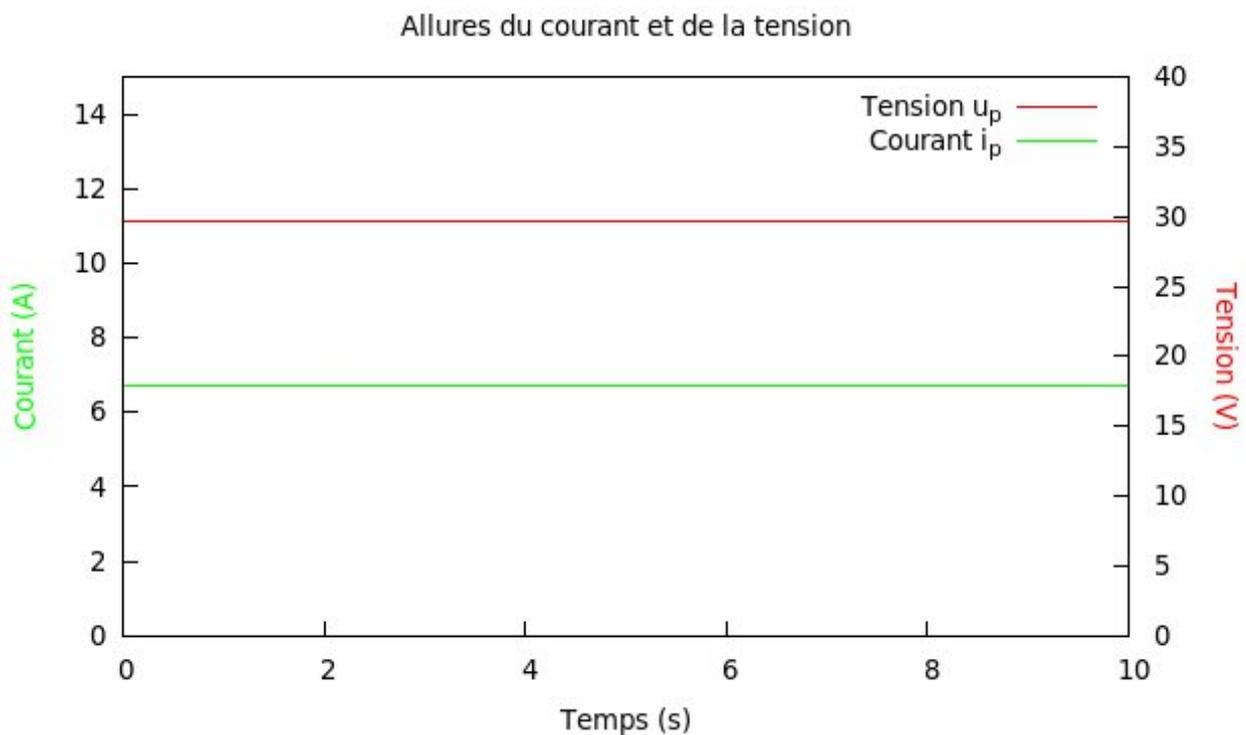


FIGURE 1.5. – Allures de la tension et du courant en sortie d'un module solaire.

2. Augmenter le niveau de tension avec un convertisseur boost

L'étape qui suit la conversion de l'énergie solaire en courant électrique basse tension, est l'élévation de tension. On utilise pour ça un convertisseur continu-continu dit *survolteur*. Le plus simple est le convertisseur boost¹.

1. *to boost* signifie en anglais, *faire monter*.

2. Augmenter le niveau de tension avec un convertisseur boost

2.1. Principe de fonctionnement

Le convertisseur boost convertit le courant continu basse tension en courant continu haute tension. Il transforme dans une première étape l'énergie électrique en énergie magnétique, et dans une deuxième étape l'énergie magnétique en énergie électrique. On recommence périodiquement ces deux étapes jusqu'à la fin des temps...

Le composant qui stocke l'énergie magnétique et la restitue est une bobine. Pour alterner entre les phases de chargement et de déchargement de la bobine, on change la configuration du circuit en ouvrant et fermant des interrupteurs. Dans une des configurations, la source fournit de l'énergie à la bobine; dans l'autre, la bobine fournit de l'énergie vers la sortie.

Dans la pratique, les interrupteurs sont réalisés avec des transistors² et des diodes³. La figure ci-dessous montre le schéma d'un convertisseur boost (en haut à gauche), son schéma avec des interrupteurs idéaux (en haut à droite), ainsi que les deux configurations du convertisseur (en bas).

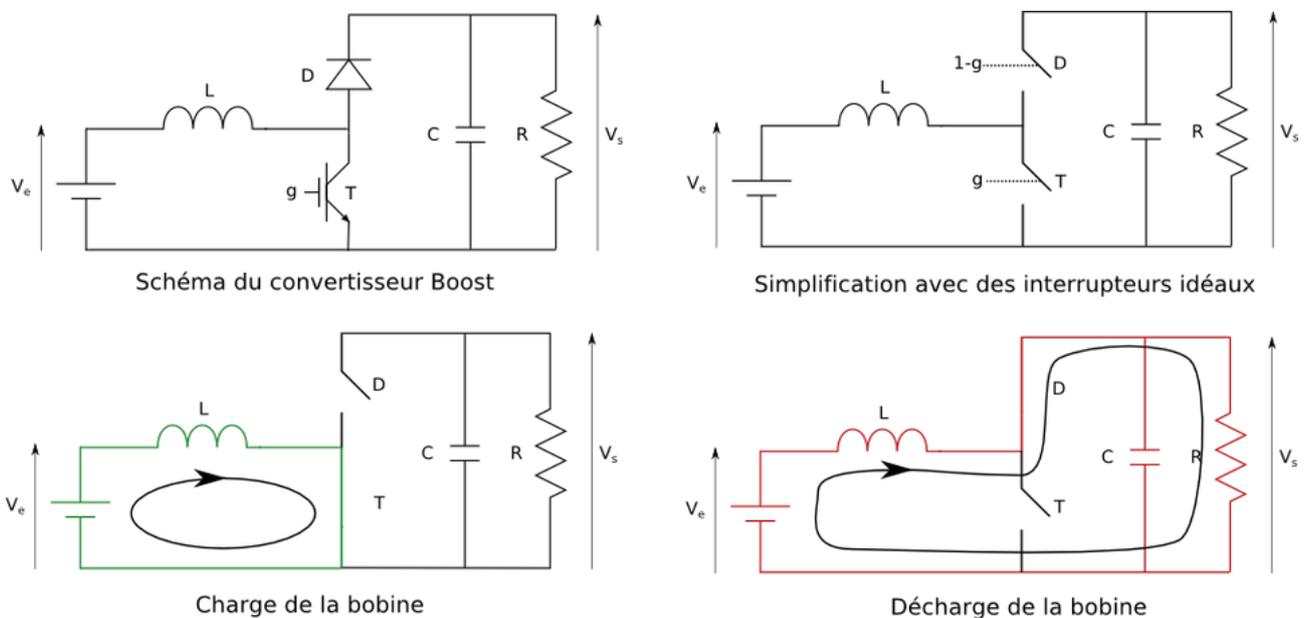


FIGURE 2.6. – Schémas du convertisseur boost et ses deux configurations.

Une tension continue désigne de manière générale une tension dont la valeur moyenne est non nulle. Ce n'est donc pas forcément une tension constante, et peut présenter des ondulations. C'est également la même chose pour le courant. Dans le convertisseur boost, le courant d'entrée et la tension de sortie présentent justement des ondulations.

L'idéal est de ne pas avoir d'ondulations, pour se rapprocher au mieux d'un courant et d'une tension constante. Pour se rapprocher de ce cas idéal, on insère au niveau de la sortie un condensateur pour lisser la tension. Il est souvent supposé que le condensateur est assez gros pour lisser totalement la tension. Pour lisser le courant, on doit choisir une bobine de haute

2. Les transistors sont des MOSFET pour les puissances modérées et des IGBT pour les puissances plus fortes.

3. Les diodes utilisées sont des diodes de puissance, conçues spécialement pour présenter des pertes plus basses que les diodes classiques dites diode *signal*.

2. Augmenter le niveau de tension avec un convertisseur boost

inductance, volumineuse. Souvent, la place nécessaire ne permet pas de choisir une bobine grosse, et on a donc des ondulations de courant, qui doivent être suffisamment faibles.

La figure ci-dessous montre les ondulations de courant qu'on peut avoir. Le signal de commande est de période T et l'on charge la bobine de 0 à DT (D étant entre 0 et 1), avant de la décharger de DT à T et ainsi de suite.

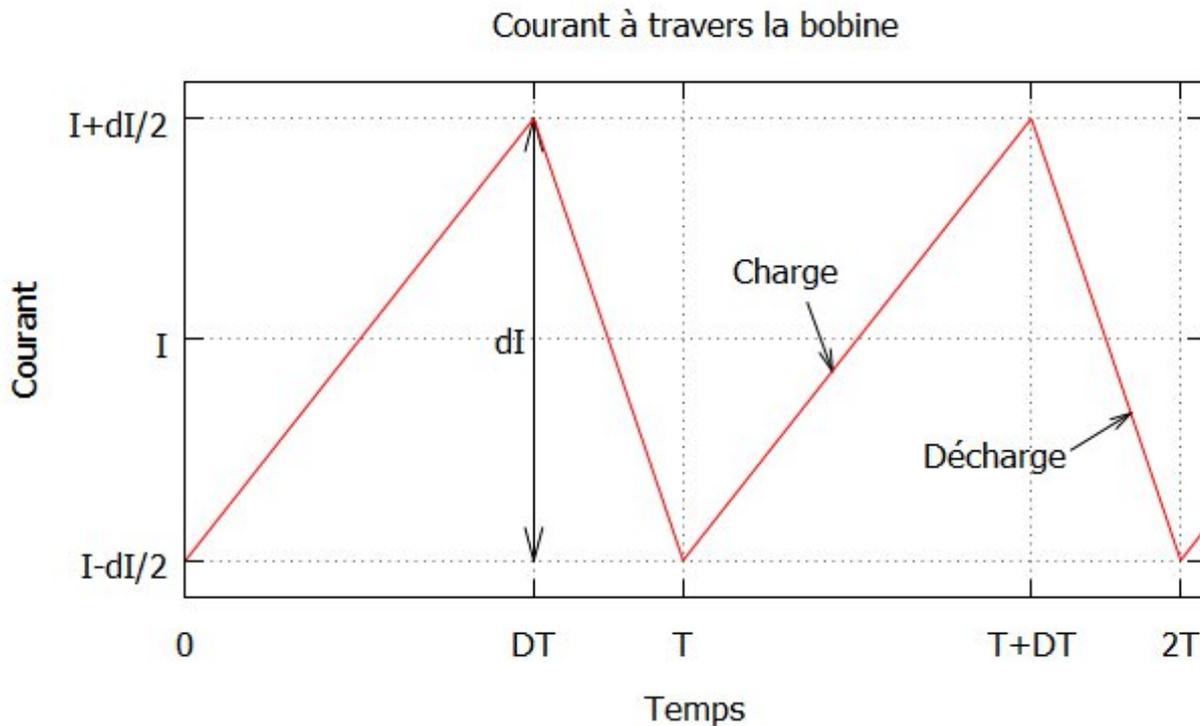


FIGURE 2.7. – Charge et décharge périodique de la bobine.

On peut bien sûr justifier que la forme du courant soit celle-ci. Lorsque l'interrupteur est fermé (boucle verte dans le schéma électrique), la bobine est soumise à la tension constante V_e . L'équation suivante s'applique:

$$V_e = L \frac{di_e}{dt}$$

Comme V_e est constante, on intègre:

$$i_e(t) = \frac{V_e}{L} t + K$$

Il s'agit d'une droite de pente positive. La constante K est inconnue, mais peut se déterminer à l'aide du courant moyen traversant la bobine, qui peut se calculer. C'est l'objet du paragraphe suivant! Un calcul similaire donne une pente négative pour la configuration avec l'interrupteur ouvert (boucle rouge sur le schéma électrique).

Avoir du courant continu avec des ondulations au lieu d'avoir du courant constant peut paraître gênant au premier abord. En pratique, les ondulations sont petites et ne posent pas trop de

2. Augmenter le niveau de tension avec un convertisseur boost

problèmes⁴, et c'est seulement la valeur moyenne du courant (autour de laquelle se font les ondulations) qui est utile pour le fonctionnement du système.

2.2. Régler la sortie par rapport à l'entrée

La lettre D désigne le rapport de la durée pendant laquelle le transistor est ouvert et de la durée pendant lequel il est fermé. C'est le rapport cyclique du signal de commande du transistor. Il est compris entre 0 et 1.

Le rapport entre la tension d'entrée V_e et la tension de sortie V_s vérifie:

$$\frac{1}{1 - D} = \frac{V_s}{V_e}$$

Ce résultat s'obtient à partir d'un raisonnement sur la valeur moyenne de la tension aux bornes de la bobine. La figure suivante montre la valeur du rapport de conversion en fonction de D .

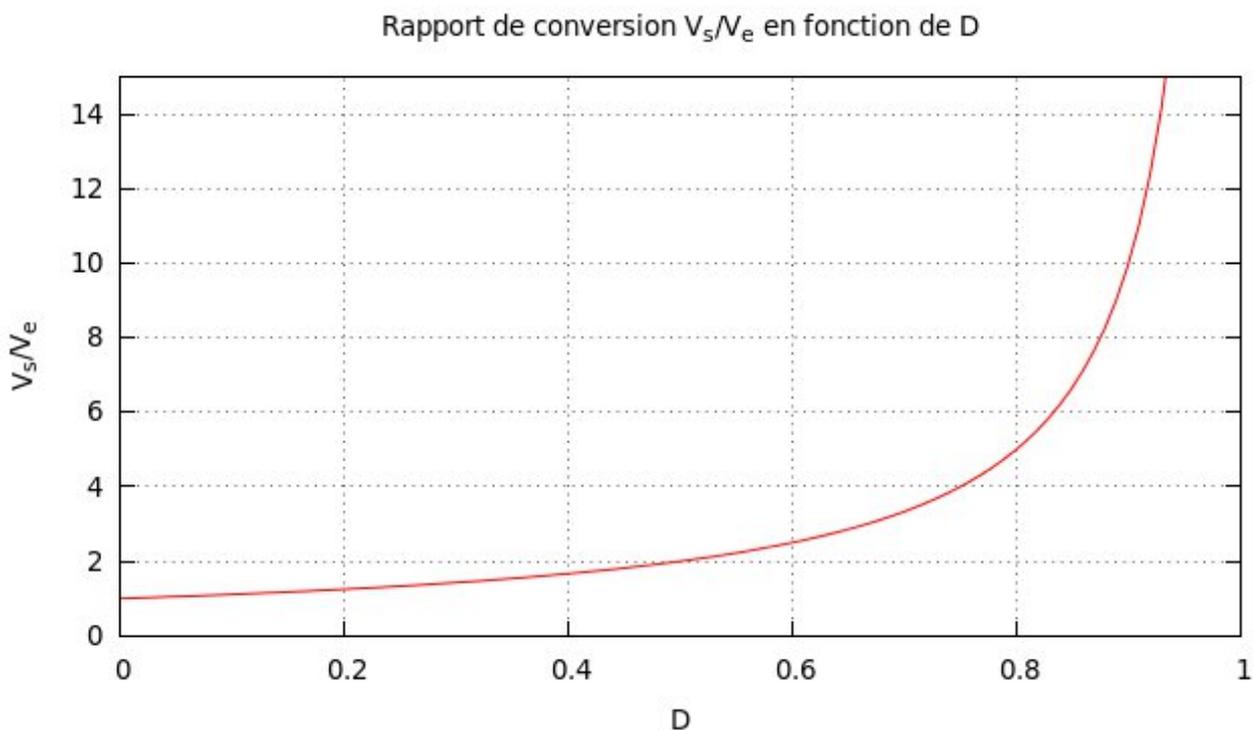


FIGURE 2.8. – Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.

Le rapport cyclique D contrôle donc la valeur de la sortie à tension d'entrée constante. On peut donc ajuster ainsi la sortie à notre entrée, ce qui permet en particulier de déplacer le point de fonctionnement du panneau solaire pour maximiser la puissance en sortie! Ce réglage

4. Certaines sources de tension sont sensibles aux ondulations de courant. Elles réagissent mal aux variations, et peuvent présenter des chutes de tension, etc.

2. Augmenter le niveau de tension avec un convertisseur boost

est nécessaire, car la caractéristique du panneau solaire change, entre autres, en fonction de l'éclairage et de la température.

La courbe ci-dessus montre que, théoriquement, on peut obtenir un rapport de conversion infini. En pratique, ce n'est pas le cas, à cause des résistances parasites de la bobine et du condensateur.

On remarque également que D étant inférieur à un, alors V_s est effectivement supérieur à V_e . Pour assurer la conservation de l'énergie, il faut aussi que le courant de sortie I_s soit inférieur au courant d'entrée I_e .

Pour le montrer, on néglige les pertes au sein du convertisseur, ce qui signifie que l'énergie est conservée. On égalise les puissances en entrée et en sortie:

$$V_s I_s = V_e I_e$$

On a alors:

$$I_s = (1 - D)I_e$$

comme D est inférieur à un alors I_s est bien inférieur à I_e .

#Synthèse

Nous avons la deuxième brique de notre chaîne de conversion: nous convertissons le courant continu basse tension en courant continu à plus haute tension. Cette étape est représentée sur le schéma ci-dessous.

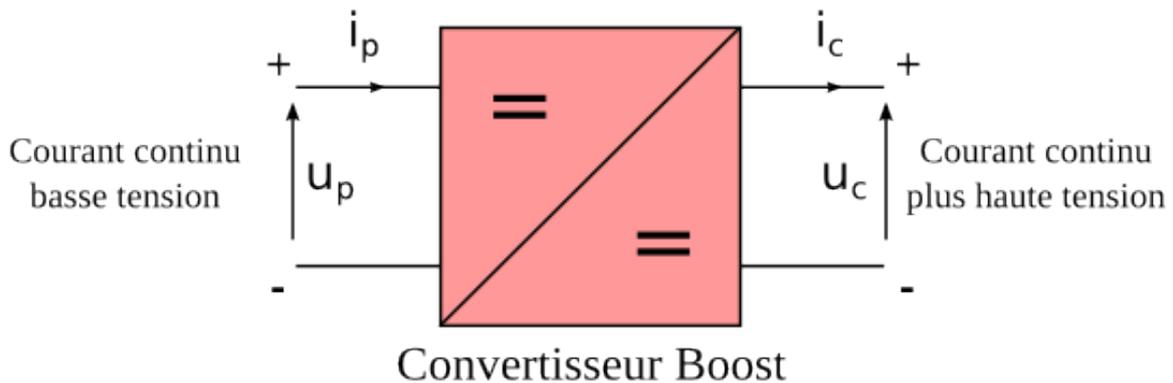


FIGURE 2.9. – La deuxième brique de notre chaîne de conversion.

En négligeant les ondulations, on obtient les allures⁵ de la figure suivante:

3. Produire du courant alternatif avec un onduleur

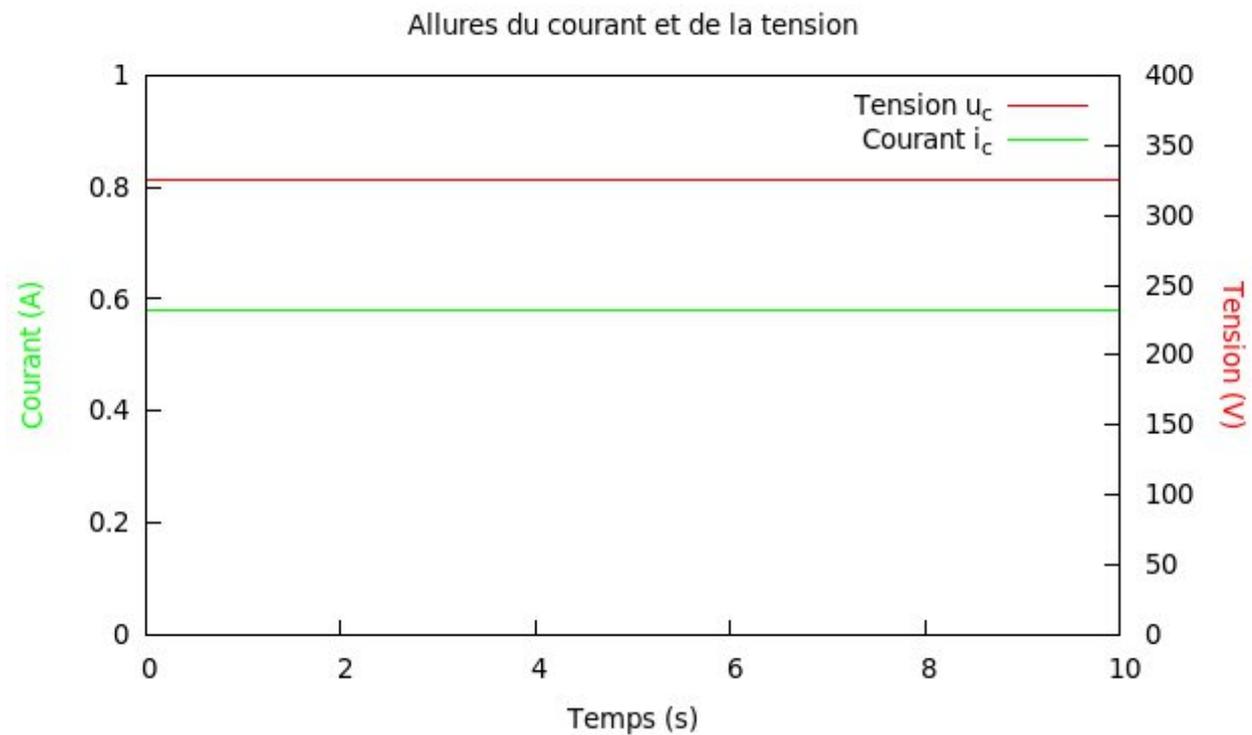


FIGURE 2.10. – Allures de la tension et du courant en sortie du convertisseur boost.

3. Produire du courant alternatif avec un onduleur

La prochaine étape est la transformation du courant continu en un courant alternatif. Elle se fait à l'aide d'un montage appelé **onduleur**.

3.1. Principe de fonctionnement

L'onduleur prend en entrée une tension continue. En général, elle n'est pas parfaitement constante, mais les effets sont minimes, parce que le condensateur en entrée lisse bien la tension (voir le schéma ci-dessous). On a ensuite un pont à quatre transistors, qui servent d'interrupteurs. On peut alors appliquer en sortie trois tensions différentes, en commandant correctement les interrupteurs: la tension nulle, la tension d'entrée, et l'opposé de la tension d'entrée.

5. La courbe est bien une allure, réalisée en supposant qu'on augmentait la tension d'un seul panneau solaire. Dans la réalité, c'est impossible avec un seul convertisseur boost, car le rapport de conversion nécessaire, qui vaut environ 10, est impossible à atteindre à cause des effets parasites. La solution actuelle sur les panneaux solaires domestiques est de mettre plusieurs panneaux en série, ou pour les petites installations d'utiliser un transformateur à la fin de la chaîne de conversion pour augmenter la tension.

3. Produire du courant alternatif avec un onduleur

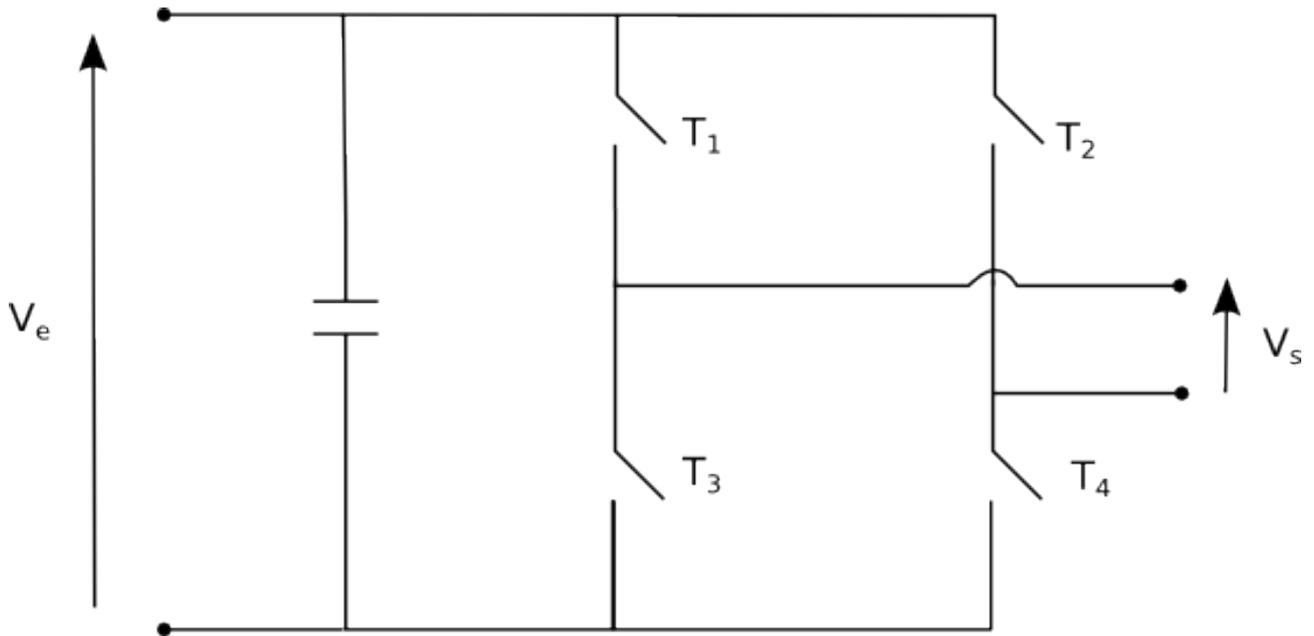


FIGURE 3.11. – Schéma d'un onduleur.

Les transistors ne peuvent pas être fermés tous en même temps dans la même branche. Par exemple, si T_1 et T_3 étaient fermés tous les deux, alors le condensateur en entrée serait en court-circuit, et se viderait, ce qui n'est pas souhaité.

Le tableau ci-dessous résume comment commander les transistors pour obtenir les différents niveaux de tension. O signifie *ouvert* et F signifie *fermé*.

T_1	T_2	T_3	T_4	V_s
O	O	F	F	0
O	F	F	O	$-V_e$
F	F	O	O	0
F	O	O	F	$+V_e$

3.2. Modulation de largeur d'impulsion

Nous avons vu que l'on disposait avec ce montage de trois niveaux de tension seulement. Cela n'a pas l'air bien folichon pour réussir à faire une tension sinusoïdale! Pourtant c'est (presque) possible, avec une technique qui s'appelle la **modulation de largeur d'impulsion**¹, ou MLI.

Le principe de la modulation de largeur d'impulsion est de réaliser un signal rectangulaire, dont le temps passé au niveau haut et au niveau bas change au cours du temps. On parle de rapport cyclique variable. Le nom *modulation de largeur d'impulsion* vient du fait que les rectangles sont des impulsions, et que leur largeur est modulée, c'est-à-dire varie, au cours du temps. Mais ça ne fait pas encore une sinusoïde!

1. Les anglophones parlent de PWM pour *pulse-width modulation*. On rencontre l'acronyme régulièrement, même en français.

3. Produire du courant alternatif avec un onduleur

En fait, on n'obtient jamais une sinusoïde, mais un signal dont la fréquence sera celle de la sinusoïde du réseau électrique. On peut obtenir un signal avec la même fréquence plus simplement, avec un carré par exemple, mais ce sera au prix de plus de fréquences parasites indésirables. Comme on ne veut pas de fréquences indésirables, la MLI est un bon compromis. Il est par contre nécessaire d'actionner les transistors très rapidement (typiquement au moins 15 fois plus vite que la fréquence du réseau, soit typiquement 750Hz et plus).

Pour réaliser le signal MLI, c'est en fait assez simple. Il suffit de comparer un triangle et un sinus! Le fondamental du signal est proportionnel au rapport de l'amplitude du sinus sur l'amplitude du triangle. Ce rapport, noté m est en général assez proche de 1 (0,8 par exemple). On a un donc un fondamental de la forme suivante, où U est la tension en sortie du convertisseur boost:

$$u_f(t) = U \cdot m \cdot \sin(\omega t)$$

Ce fondamental est à la fréquence du réseau (50Hz), et c'est le signal utile² qu'on peut transmettre au réseau. On obtient le résultat sur la courbe suivante.

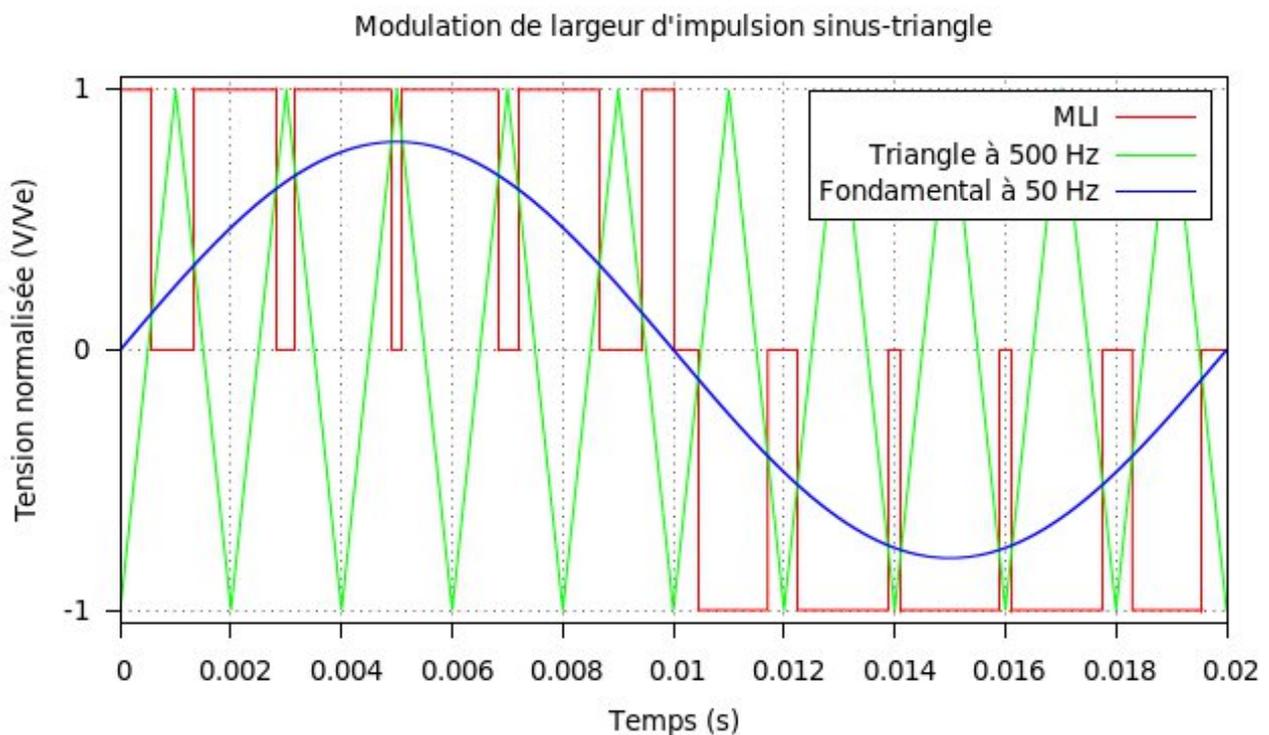


FIGURE 3.12. – Un exemple de MLI.

On comprend maintenant pourquoi il était nécessaire d'élever le niveau de tension avec le convertisseur boost. Pour effectuer la modulation de largeur d'impulsion, il faut que la tension en entrée de l'onduleur soit au moins égale à l'amplitude de la tension à fournir au réseau!

2. Le signal fourni au réseau comprend également d'autres fréquences, les *harmoniques*. Elles doivent être éliminées par filtrage, car elles peuvent entraîner des dysfonctionnements sur les appareils sensibles et augmentent les pertes dans certains équipements comme les transformateurs. Les harmoniques usuellement filtrées sont les harmoniques de rang 3 (150Hz) et de rang 5 (250Hz).

3. Produire du courant alternatif avec un onduleur

L'onduleur fournit un signal presque sinusoïdal, à la fréquence souhaitée pour le réseau. Pour le rendre plus sinusoïdal, il est utile de rajouter un filtre en sortie. Une fois fait, on peut raccorder au réseau!

3.3. Synthèse

Nous avons dans cette partie pris la sortie du convertisseur boost, qui est une tension continue, pour la transformer à travers un onduleur commandé en modulation de largeur d'impulsion, et dont la sortie peut-être filtrée.

On peut résumer l'action de l'onduleur par le schéma ci-dessous.

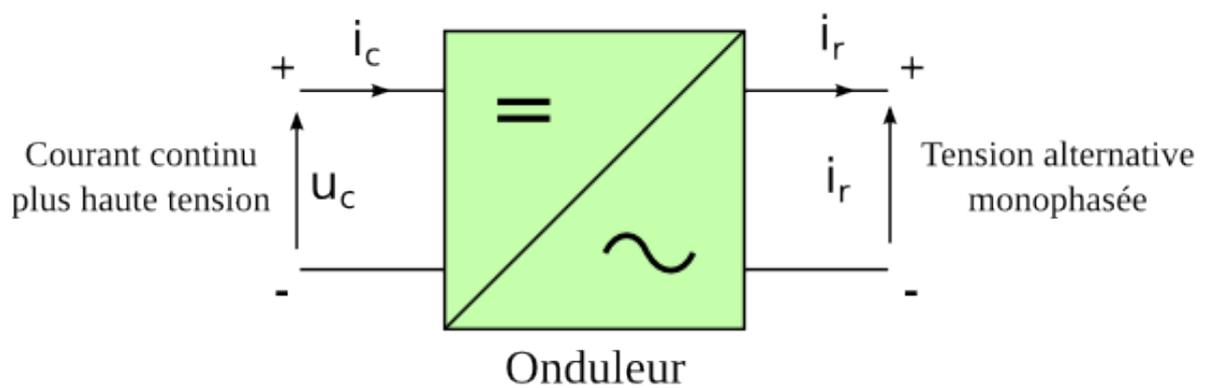


FIGURE 3.13. – La troisième brique de notre chaîne de conversion.

On obtient enfin des tensions et courants de formes adaptées au réseau électrique. Elles sont schématisées sur la figure suivante.

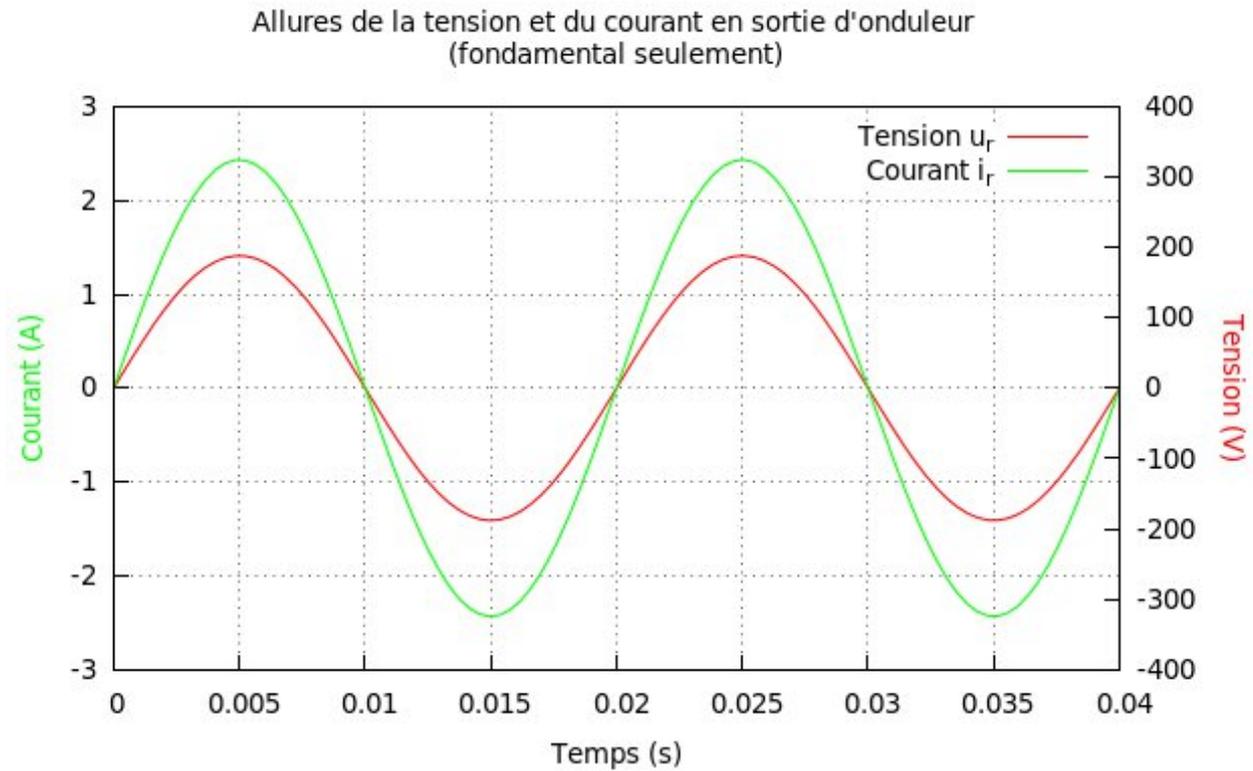


FIGURE 3.14. – Allures de la tension et du courant en sortie d'onduleur.

Conclusion

Vous avez découvert comment fonctionnent les panneaux solaires, composés de cellules solaires, fabriquée en silicium, et assemblées en série ou en parallèle. Nous avons aussi expliqué comment un convertisseur boost était capable d'élever une tension continue en utilisant une bobine comme stockage intermédiaire. Enfin, vous avez aussi vu comment obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue avec un onduleur dont les interrupteurs sont commandés en modulation de largeur d'impulsion.

Tous ces éléments sont assemblés ensemble et forment une chaîne de conversion, qui est schématisée ci-dessous.

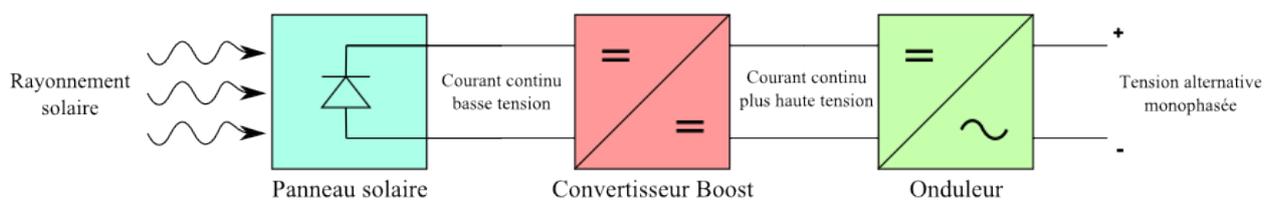


FIGURE 3.15. – Schéma de la chaîne de conversion.

Ce cours n'était qu'une présentation de la chaîne de conversion *standard* telle qu'on peut la trouver dans une installation solaire domestique. Les constructeurs ont bien sûr leurs propres

Conclusion

améliorations par-dessus (filtrage, commande, optimisations...). Chaque thème de cette introduction est assez vaste et peut être approfondi! Si vous voulez en savoir plus sur un des thèmes, n'hésitez pas à chercher des informations autour des sujets suivants:

- commande de transistors MOSFET ou IGBT,
- le comportement plus détaillé des panneaux (ensoleillement, échauffement, rendement),
- filtrage d'harmoniques (en particulier les rangs 3 et 5),
- synchronisation de l'onduleur avec le réseau,
- pertes énergétiques dans les transistors et diodes...

Miniature de la publication sous licence CC BY-ND 3.0 par [icons8](#) .